

BEST AVAILABLE COPY

20.7.2004

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年 7月16日

出願番号
Application Number: 特願2003-275037
[ST. 10/C]: [JP2003-275037]

REC'D	10 SEP 2004
WIPO	PCT

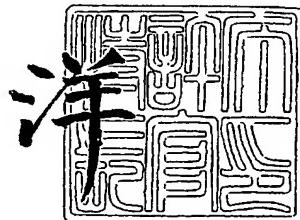
出願人
Applicant(s): 株式会社進化システム総合研究所
株式会社半導体先端テクノロジーズ

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 8月26日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

八月



【書類名】 特許願
【整理番号】 ERI-0307
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 G06F 17/00
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都港区浜松町2-1-13芝エクセレントビル8階株式会社
 【氏名】 進化システム総合研究所内
 村川 正宏
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都港区浜松町2-1-13芝エクセレントビル8階株式会社
 【氏名】 進化システム総合研究所内
 伊藤 桂一
【発明者】
 【住所又は居所】 茨城県つくば市小野川16-1株式会社半導体先端テクノロジー
 ズ内
 【氏名】 和田 哲典
【特許出願人】
 【識別番号】 301080459
 【氏名又は名称】 株式会社進化システム総合研究所
【特許出願人】
 【識別番号】 597114926
 【氏名又は名称】 株式会社半導体先端テクノロジーズ
【代理人】
 【識別番号】 100102336
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 久保田 直樹
【選任した代理人】
 【識別番号】 100106851
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 野村 泰久
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 050533
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1

【書類名】特許請求の範囲**【請求項 1】**

半導体素子の物理モデルの複数のパラメータのそれぞれを遺伝子とする染色体を定義し、試作された半導体素子の特性測定データに基づき、遺伝的アルゴリズムを使用してパラメータを最適化するパラメータ調整手段を備えたことを特徴とするパラメータ調整装置。

【請求項 2】

前記パラメータ調整手段は、遺伝的アルゴリズムにおける交叉処理において、親染色体群のベクトル空間における重心を求め、前記重心および親染色体群の値から定められるベクトル空間上の超多面体の内部に子染色体群の生成範囲を決定する生成範囲決定手段を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のパラメータ調整装置。

【請求項 3】

前記パラメータ調整手段は、遺伝的アルゴリズムにおける淘汰処理において、線形スケールのデータに基づく第 1 評価値およびログスケールのデータに基づく第 2 評価値の双方を求め、第 1 評価値および第 2 評価値の合計を当該染色体の評価値とする評価値算出手段を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のパラメータ調整装置。

【請求項 4】

前記パラメータ調整手段は、遺伝的アルゴリズムにおける淘汰処理において、データのスケールを統一する正規化手段を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のパラメータ調整装置。

【請求項 5】

前記パラメータ調整手段は、遺伝的アルゴリズムにおけるパラメータ調整処理が所定の条件を満足した場合には、局所的探索手段に切り替える探索方法切り替え手段を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のパラメータ調整装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】パラメータ調整装置

【技術分野】

【0001】

本発明は、パラメータ調整装置に関するものであり、特に、トランジスタなどの半導体素子の物理モデルの多数のパラメータを短時間で調整可能なパラメータ調整装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

LSIの製造を行う場合、まず、当該製造ラインでトランジスタ(MOSFET)のゲートのチャネル長Lおよびチャネル幅W等の形状の異なる幾つかのトランジスタ(MOSFET)のサンプルを試作する。次に、この試作品の電気的特性の測定結果から、当該製造ラインにおいて製造されるトランジスタの特性に高精度で合致するように、トランジスタの物理モデルの複数のパラメータを調整する。そして、このトランジスタの物理モデルを使用して、SPICEなどの周知の回路シミュレータによって当該製造ラインにおいて製造する各種LSI(トランジスタ)のシミュレーションが行われていた。

【0003】

トランジスタの物理モデルは、 V_g (ゲート電圧)、 V_d (ドレイン電圧)、 I_d (ドレイン電流)の関係等をゲートのチャネル長L、チャネル幅W等の変数および複数のパラメータを含む数式によって表現したものであり、多数のモデルが提案されている。そして、上記シミュレーションには例えば代表的な周知のBSIM(Berkeley Short Channel 1 GFET Model)が使用されていた。

【0004】

BSIMは多数の数式からなり、調整すべきパラメータの数は50個以上ある。なお、トランジスタの物理モデルの詳細および従来のパラメータ調整方法については例えば下記文献に記載されているので、詳細な説明は省略する。

【非特許文献1】鳥谷部達監修「MOSFETのモデリングとBSIM3ユーザーズガイド」平成14年2月28日丸善発行。

【0005】

また、従来、実験結果などから遺伝的アルゴリズムを用いて複数のパラメータを含む物理モデルのパラメータフィッティング(調整)処理を自動的に行うパラメータ調整装置が提案されている。例えば、本発明の発明者らが先に出願した下記の文献には、遺伝的アルゴリズムを用いて複数のパラメータを含む物理モデルのパラメータ調整処理を自動的に行う一般的なパラメータ調整装置が提案されている。

【特許文献1】特開2003-108972号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記した従来のパラメータ調整方法においては、多数のパラメータを同時に最適化することは出来ないので、一部のパラメータのみをまず最適化し、このパラメータを固定して他の一部のパラメータを最適化するという作業を繰り返すことによってパラメータ全体の調整を行っていた。ところが、この方法では最適化するパラメータの処理順序によっては最適なパラメータに収束しない、あるいは収束させるために多大の時間と労力を要するという問題点があった。

【0007】

そこで、本発明者は上記した一般的なパラメータ調整処理をトランジスタの物理モデルのパラメータ調整に適用することを検討したが、従来の遺伝的アルゴリズムをそのままトランジスタの物理モデルのパラメータ調整に適用しても効率および精度のよいパラメータの調整ができないという問題点があった。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、上記した課題を解決することを目的とし、このために、本発明のパラメータ調整装置は特殊な交叉処理によって新たなパラメータ遺伝子を生成する手段を備えたことを主要な特徴とする。また、実数であるパラメータに適用するために正規化手段を備えた点にも特徴がある。更に、トランジスタ（MOSFET）特有の特性に高精度で合致するようにパラメータの評価を行う評価手段にも特徴がある。

【発明の効果】

【0009】

本発明のパラメータ調整装置は上記のような特徴によって、トランジスタの物理モデルのパラメータ調整に遺伝的アルゴリズムを適用することが可能となり、短時間で最適なパラメータ群を決定できるという効果がある。

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

本発明のパラメータ調整装置は、後述するフローチャートによって示された処理を実行するプログラムを作成し、このプログラムを実行可能な周知の任意のコンピュータシステムにインストールすることによって実現する。なお、コンピュータシステムのハードウェアについては周知があるので詳細な説明は省略する。以下実施例1について説明する。

【実施例1】

【0011】

図1は、本発明のパラメータ調整装置を使用してシミュレーションを行う場合の全体の手順を示すフローチャートである。前記したように、LSIの製造を行う場合、まずS50においては、当該LSI製造ラインでゲートのチャネル長Lおよびチャネル幅W等の形状の異なる幾つかのトランジスタ（MOSFET）のサンプルを試作する。

【0012】

図9は、試作するトランジスタの形状の選択方法を示す説明図である。形状の選択方法は、例えばLおよびWの最大値および最小値の間を等間隔で、あるいは最小値に近い方をより細かく区分し、L-W平面上で十字形状になるように試作するトランジスタの区分（形状）を選択する。

【0013】

S51においては、試作したトランジスタの電気的特性を測定する。具体的にはIdVd特性（Vb固定）、IdVg特性（Vg固定）、IdVg特性（Vd固定）についてそれぞれ複数個のサンプル値（離散データ）を得る測定を固定値を変えて複数回行う。

【0014】

S52においては、当該製造ラインにおいて製造されるトランジスタの特性に高精度で合致するように、本発明のパラメータ調整装置を使用して後述する方法によってトランジスタの物理モデルのパラメータ調整処理を行う。

【0015】

S53においては、パラメータが調整された物理モデルを使用して、SPICEなどの周知の回路シミュレーションプログラムを使用して当該製造ラインにおいて製造する任意のチャネル長およびチャネル幅のトランジスタ回路の動作シミュレーションを行う。

本発明のパラメータ調整装置を使用することにより、物理モデルの精度の高いパラメータが短時間で得られ、精度の高いシミュレーションを行うことができる。

【0016】

図2は、遺伝的アルゴリズムを使用したパラメータ調整（フィッティング）処理を示す概略フローチャートである。S41においては、一つ以上の離散データ群（測定結果）を用意する。S42においては、トランジスタの物理モデル関数の任意のパラメータを遺伝子とする染色体をN個生成し、個体集団とする。個体の生成とは染色体中の遺伝子の値を決定し、その染色体の評価値を計算することである。なお、Nは2以上の数でなければならない。

B SIMには前記したように50個以上のパラメータがあるが、シミュレーションした

い内容によっては、調整を行わずに代表値に固定しておけばよいか、あるいは無視してよいパラメータもある。従って、調整すべきパラメータの数nはシミュレーションする目的によって異なり、50個以上の場合もあるが、例えば10個の場合もある。そこで、調整すべきパラメータの数nに依存して遺伝的アルゴリズムにおける染色体数Nや子の生成数(Child)などのパラメータを変化させるようにした。このことによって、nが小さければ処理も速くなる。実施例においては、例えば染色体数N=n×15とする。

また、BSIMにおいては、各パラメータについて推奨するパラメータ初期値の範囲が定められているので、各パラメータについて、推奨するパラメータ初期値の範囲内においてランダムに初期値を決定して遺伝子の値とする。

【0017】

S43においてはS42で生成された個体集団より、親個体となる染色体を選ぶ。この処理で選択する親個体の数pはN個以下である必要がある。そして、選択された親個体から後述する交叉処理により子個体を生成する。S44においてはS43で生成された子個体の評価値を計算する(詳細は後述する)。

【0018】

S45においてはS43で選択した親個体と、S44で生成した子個体の中から評価の良い順にp個を個体集団に戻し、残りを破棄する。この処理によって評価値の低い染色体が淘汰される。なお、この他に、親個体の一部を淘汰の対象にせずにそのまま母集団に戻し、残りの親個体と子個体から評価の良い順に「残りの親個体」数分戻す方法を用いてよい。

【0019】

S46においてはアルゴリズム切り替え条件が満足されたか否かを判定し、条件を満たしていない場合はS43に戻るが、条件を満たしている場合はS47に移行する。条件としては、計算回数が所定値を超えたか否か、あるいは評価値の減少率が所定値を下まわったか否かなどが上げられる。S47においては局所的探索法として、例えば公知のPowell法あるいはその他の公知の局所的探索法によりパラメータの調整を行う。このように探索方法を切り替えることにより、パラメータ調整時間が短縮する。

【0020】

次に本発明における交叉処理について説明する。従来の交叉法としては染色体の遺伝子を部分的に入れ替える処理が用いられていた。この交叉法は遺伝子がビット値(0または1)である時には有効な手法であるが、遺伝子が実数値である場合には必ずしも有効な交叉法ではない。なぜならば、2進数表現により定義される遺伝子型の空間は、実数値に変換後における実際のパラメータの空間とは位相構造が異なっているため、パラメータの連続性が考慮されないからである。

【0021】

例えば、2進数の中の1ビットが反転した場合、変換後のパラメータは反転したビットの位置によって、最上位ビットが反転した場合には大きく変化するが、最下位ビットが反転した場合にはパラメータ値はほとんど変化しない。本発明で調整対象となるパラメータは実数値であるため、従来の交叉方法では有効的な調整を行うのは難しい。そこで従来の交叉法ではなく、以下に述べる実数値向けの交叉法を用いる。

【0022】

図3は、S43の交叉処理の内容を示すフローチャートである。この交叉法は複数の親個体の遺伝子から計算された多面体の中から子個体の遺伝子を生成する実数値向け交叉法である。また、図4は、本発明の交叉法の例を示す説明図である。

S31においては、個体集団からp個の親個体をランダムに選ぶ。pの値は調整するパラメータがn個の場合、p=n+1とするのが望ましい。S32においては、S31で選択したp個の親個体の重心Gを求める。即ち、各パラメータ毎に平均値を求める。

【0023】

S33においては変数cの値を1にセットし、S34においては重心G及び一様分布乱数を用いた下記の式1より子個体を一つ生成する。

【数1】

$$C = x_p + C_p$$

$$x_k = G + \varepsilon(P_k - G)$$

$$C_k = \begin{cases} 0(k=0) \\ r_{k-1}(x_{k-1} - x_k + C_{k-1})(k=1\dots p) \end{cases}$$

$$r_k = (u(0,1)^{\frac{1}{k+1}})$$

ここで、pは選択された親個体の数、Cは生成される子個体の染色体を示すベクトル、P_kは選択された親個体の染色体を示すベクトルである。なお、本実施例では選択された親個体の数はn+1個であるとする。また、u(0,1)は区間[0,1]の一様分布乱数である。

【0024】

S35においては変数cに1を加算し、S36においては変数cが定数chidlより大きいか否かが判定され、判定結果が否定の場合にはS34に戻るが、肯定の場合には交叉処理を終了する。この処理によってchidl個の子個体が生成される。chidlは10×n程度が望ましい。

【0025】

図4は、調整するパラメータをα、βの2個、個体集団よりランダムに選ばれた親個体の数を3個とした時のシンプレックス交叉の探索範囲（子個体の生成範囲）を示す説明図である。重心Gから各親個体P1～P3までのベクトルをε倍して子個体の生成範囲（図4の外側の三角形の内部）を決定し、その範囲から一様乱数を用いて子個体を生成する。εの推奨値は親個体の数がp個の時、 $\sqrt{(p+1)}$ である。なお、パラメータ数が3以上の場合には子個体の生成範囲は複数の超平面によって囲まれた超多面体の内部空間となる。

【0026】

上記の様な交叉方法を用いることで、調整対象となるパラメータが実数値である問題に対してパラメータを陽に扱うことができ、有効な調整を行う事ができる。陽に扱うことができるとは、パラメータ空間近傍にある個体が遺伝子空間でも近傍にあることを意味する。また、このような交叉手法は変数間の依存性に頑健で、スケールのとり方に依存しないという特徴があり、パラメータ間に依存性が強く、スケーリングが異なるパラメータが多数存在するトランジスタの電気特性モデル関数のパラメータ調整に適している。

【0027】

通常、遺伝的アルゴリズムにおいては交叉の他に突然変異という処理を行う。突然変異は従来の離散的な二進数値を扱う遺伝的アルゴリズムの場合、染色体の遺伝子の一部を反転させる操作を行う。また、実数値を扱う遺伝的アルゴリズムの場合でも、染色体の各遺伝子に正規分布N(0, σ²)に従って発生させた正規乱数を加算する操作が提案されている。しかし、上記したような本発明の交叉方法は交叉過程において乱数を用いているため、突然変異の性質も兼ね備えている。そのため、上記のような交叉手法を用いる場合は突然変異を行わない。

【0028】

次に、S44において実行される評価値について説明する。用意した離散データ群と染

色体中の遺伝子をモデルパラメータとするトランジスタ電気特性モデル関数で計算した推定データ群よりその染色体の評価値を計算する。評価値とは、染色体中の遺伝子がモデルパラメータとしてどれだけ理想的な値に近いかを示す値である。

【0029】

図5は、評価計算処理の内容を示すフローチャートである。S12においては染色体の遺伝子情報を読み込み、トランジスタ電気特性モデル関数のモデルパラメータとする。S13-S13-dにおいては離散データ群を読み込む。dは読み込んだ離散データ群の数である。

【0030】

S14-S14-dにおいてはS12で入力したモデルパラメータを元に離散データ群を予測する推定データ群を計算する。推定データ群は離散データ群と同じ数だけ存在する。S15においては離散データ群と推定データ群より、染色体の評価値を計算する。評価関数としては、後述する二乗誤差などが用いられる。

【0031】

図6は、トランジスタの I_dVg 特性を示す線形スケール(a)およびログ(対数)スケール(b)のグラフである。図6の楕円で囲んだ部分の様に、離散データ群の中には(a)の線形スケールで見るとほぼ0に見えるが、(b)のログスケールで見た場合、大きく値が変化している部分がある。このような性質をサブスレショルド特性という。

【0032】

この部分は、他の部分と比較すると絶対値が小さいので、誤差の絶対値も小さく、この部分を通常の線形スケールのデータ群のみを用いて最適化することは困難である。また、この部分を調整するためにログスケールのデータ群のみ用意して最適化を行うと、サブスレショルド特性は最適化することができるが、逆にそれ以外の部分の誤差が大きくなり、それが生じてしまう。

【0033】

そこで、本発明においては、MOSトランジスタ電気特性モデルパラメータはサブスレショルド特性を推定するパラメータとそれ以外の部分を推定するパラメータが独立していることに注目し、以下に示すスケーリング処理によって、ログスケールのデータ群と線形スケールのデータ群を同時に読み込んで、全ての特性を同時に調整する。

【0034】

なお、離散データ群間でスケーリングが異なる場合、二乗誤差を取るとスケールの小さいデータ群は評価値に与える影響が小さくなってしまう。そのため前述したスケーリング処理を行っても調整精度が落ちる恐れがある。そこで、本発明では各データ群中の離散データを正規化し、スケールを統一することによって調整精度を向上させる。

【0035】

図7は、S15に上記のスケーリング及び離散データ正規化手法を実装した、評価値計算の一例を示すフローチャートである。S16においては、離散データ群及び、それに対応している推定データ群をログスケールに変換した対数データを生成する。S17においては用意されたすべてのデータ群を正規化する。

【0036】

図8は、S17で行う離散データの正規化処理の一例を示すフローチャートである。S21においてはデータ群を読み込む。S22においては以下に示すデータの変換を行う。即ち、まずデータ群中の最大値 f_{max} 及び最小値 f_{min} を求める。次に、下記の式2によってデータ群中の全ての離散データ $f(i)$ を正規化データ $g(i)$ に変換する。

【数2】

$$g(i) = \frac{f(i) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$$

ここで、 $g(i)$ ：正規化データ、 $f(i)$ ：離散データ、 f_{\max} ：データ群中の最大値、 f_{\min} ：データ群中の最小値である。この演算によって離散データを[0, 1]の範囲内に正規化することができる。

【0037】

図7に戻って、S18においては線形スケールのデータ群のみの評価値を計算しAとする。Aは正規化離散データと正規化推定データの二乗誤差の合計である。S19においてはログスケールのデータ群のみの評価値を計算しBとする。Bは正規化対数離散データと正規化対数推定データの二乗誤差の合計である。S20においてはA+Bを染色体の評価値とする。なお、評価値の計算に二乗誤差を用いているが、二乗誤差の代わりに誤差率を求めるようにしてもよい。

【0038】

以上のような処理によって、短時間で高精度のパラメータ調整ができる。そして、物理モデルに当該パラメータを採用することにより、試作をせずに高精度の回路シミュレーションを行うことができるので、半導体素子の製造効率が向上する。

【0039】

以上実施例1を説明したが、本発明のパラメータ調整装置には以下のような変形例も考えられる。トランジスタの物理モデル例としてはBSIMを挙げたが、本発明はBSIMの他、公知の任意のトランジスタ物理モデルを使用可能である。更に、本発明はトランジスタ以外の公知の任意の半導体素子にも適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1】本発明のパラメータ調整装置を使用してシミュレーションを行う場合の全体の手順を示すフローチャートである。

【図2】パラメータ調整処理を示す概略フローチャートである。

【図3】S43の交叉処理の内容を示すフローチャートである。

【図4】本発明の交叉法の例を示す説明図である。

【図5】評価計算処理の内容を示すフローチャートである。

【図6】トランジスタの I_dV_g 特性を示すグラフである。

【図7】S15の評価値計算の一例を示すフローチャートである。

【図8】S17の離散データ正規化処理を示すフローチャートである。

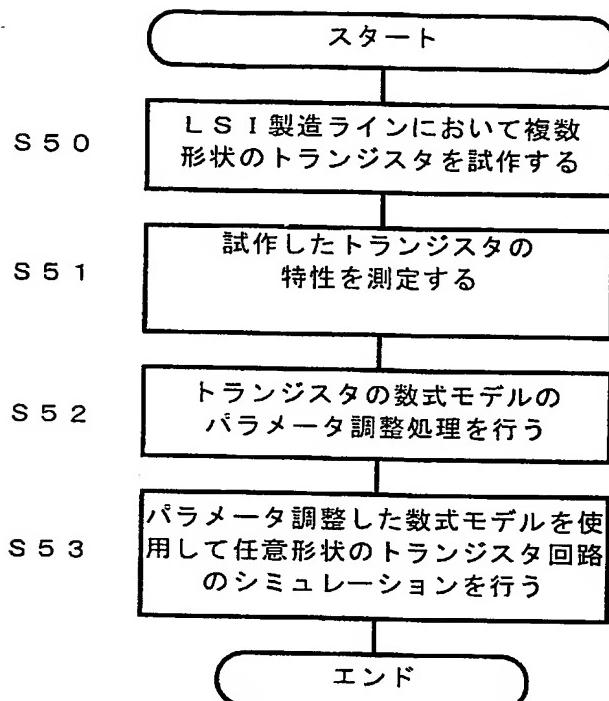
【図9】試作するトランジスタの形状の選択方法を示す説明図である。

【符号の説明】

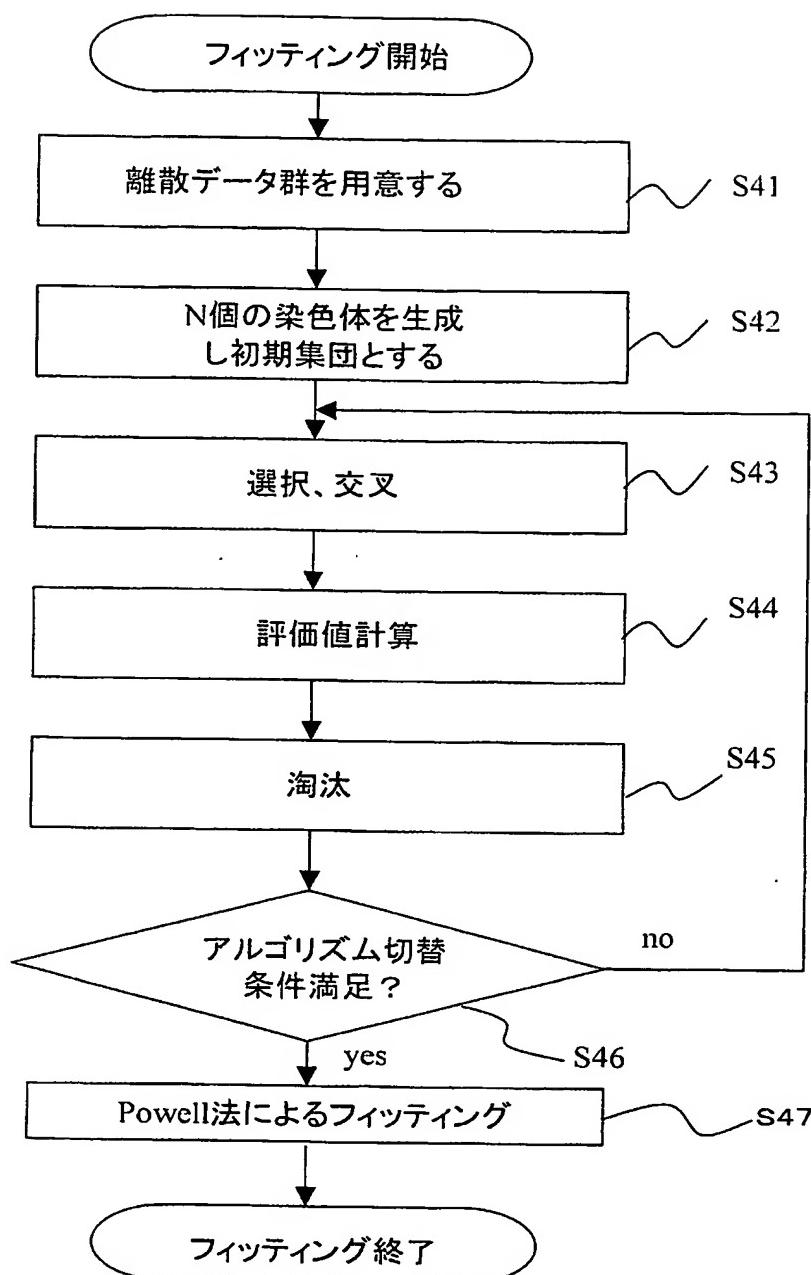
【0041】

G 重心
P1～P3 親個体

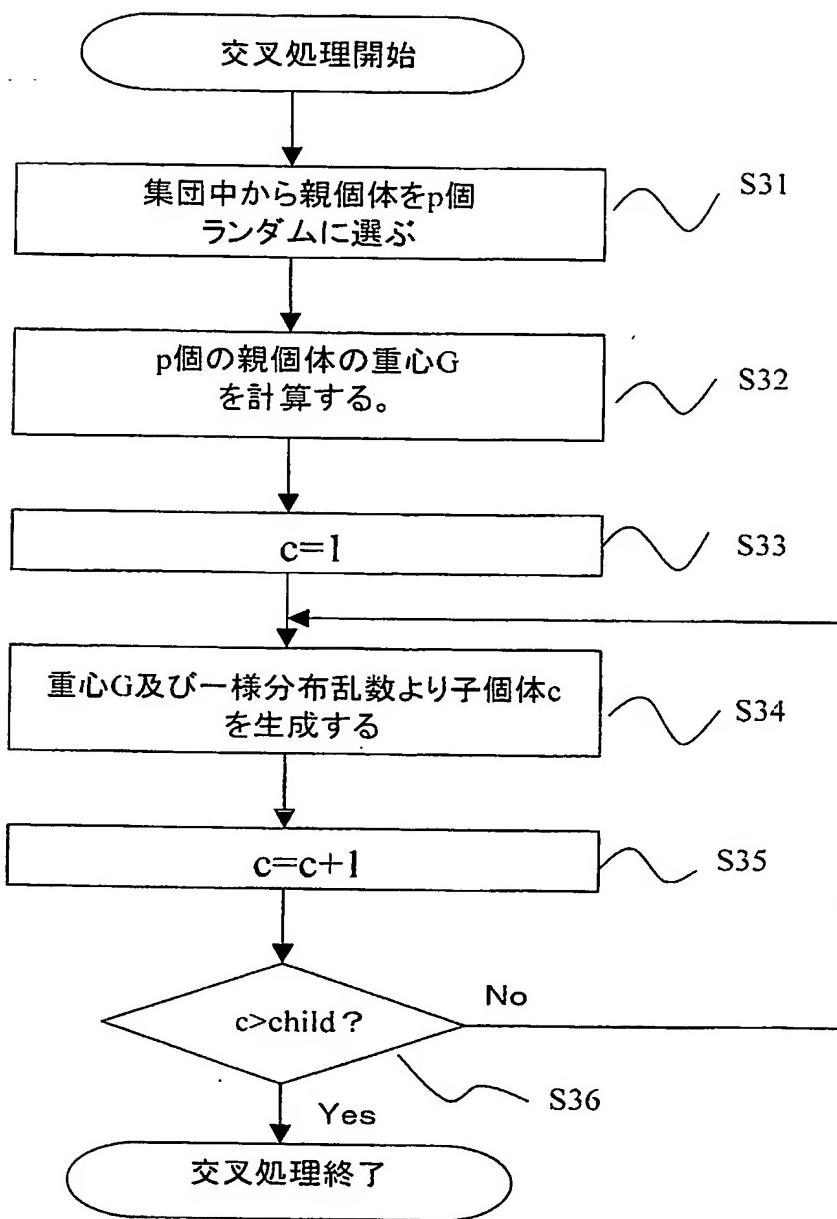
【書類名】 図面
【図1】



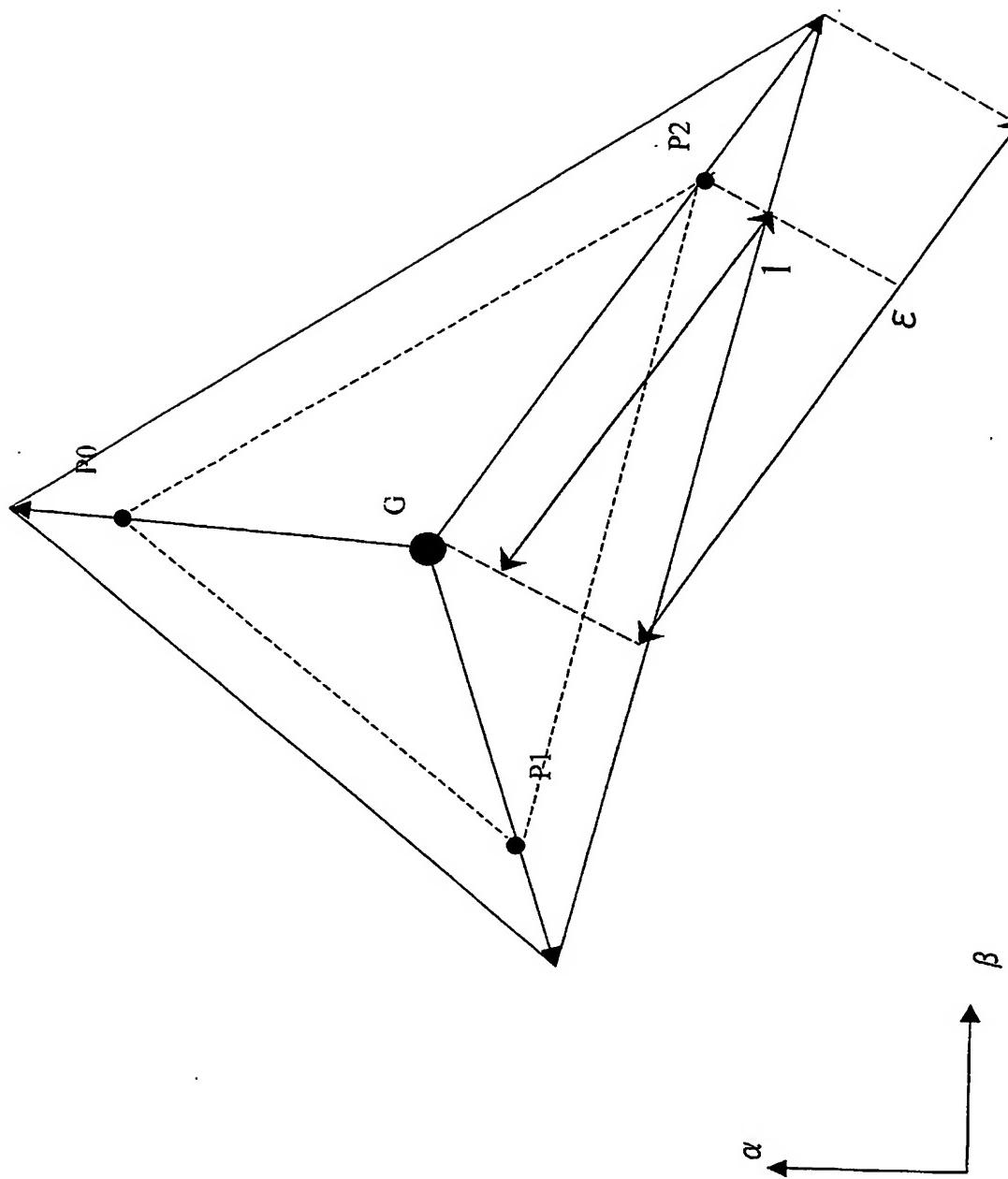
【図 2】



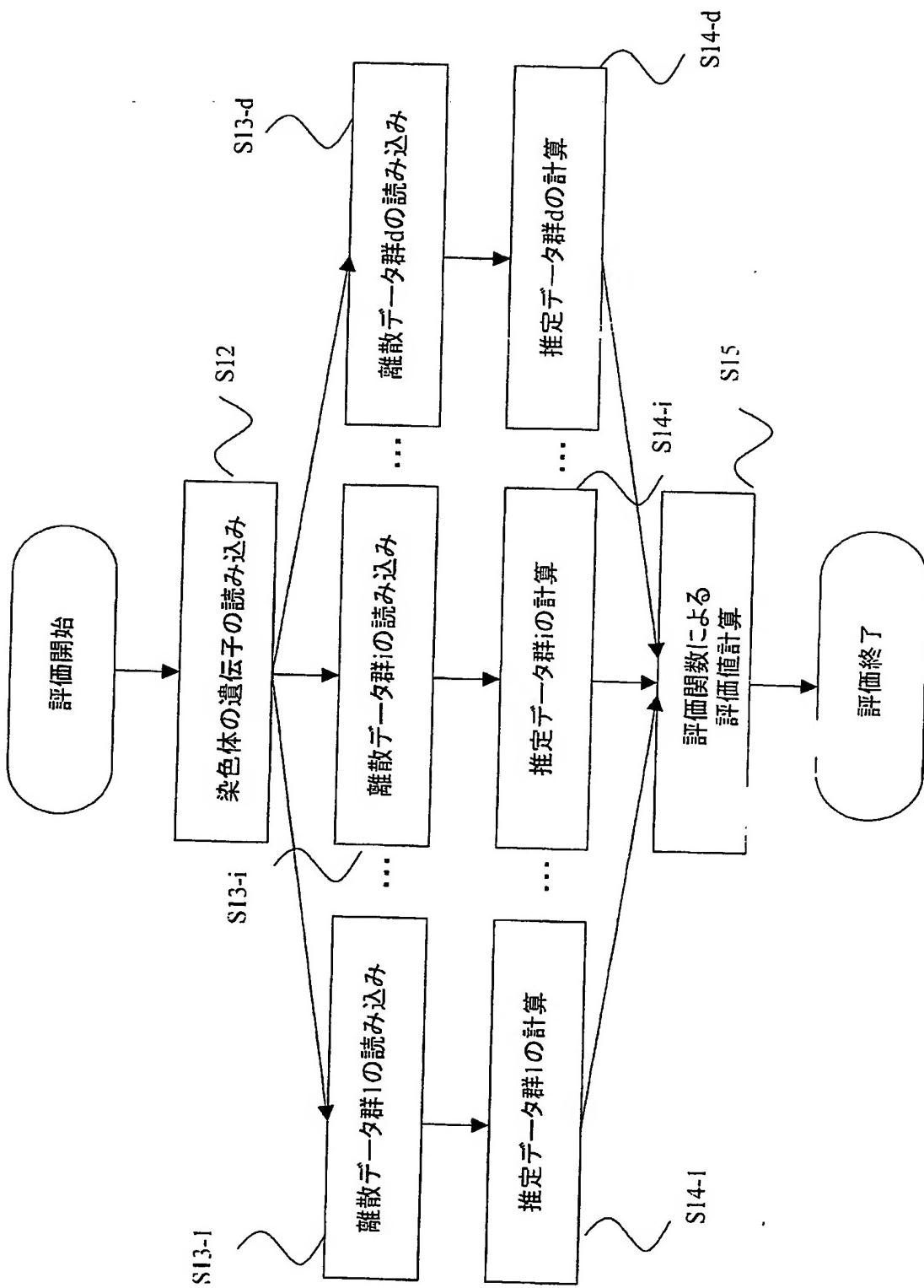
【図3】



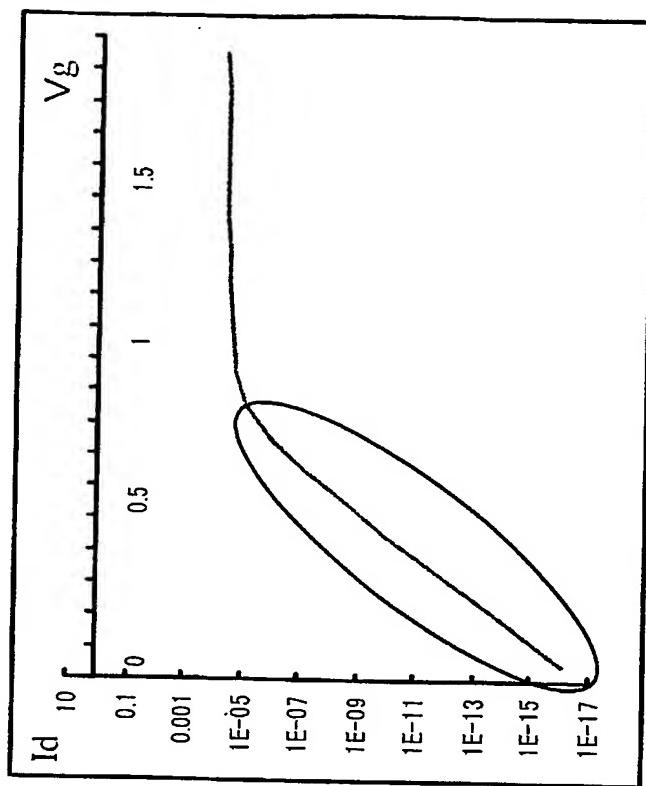
【図4】



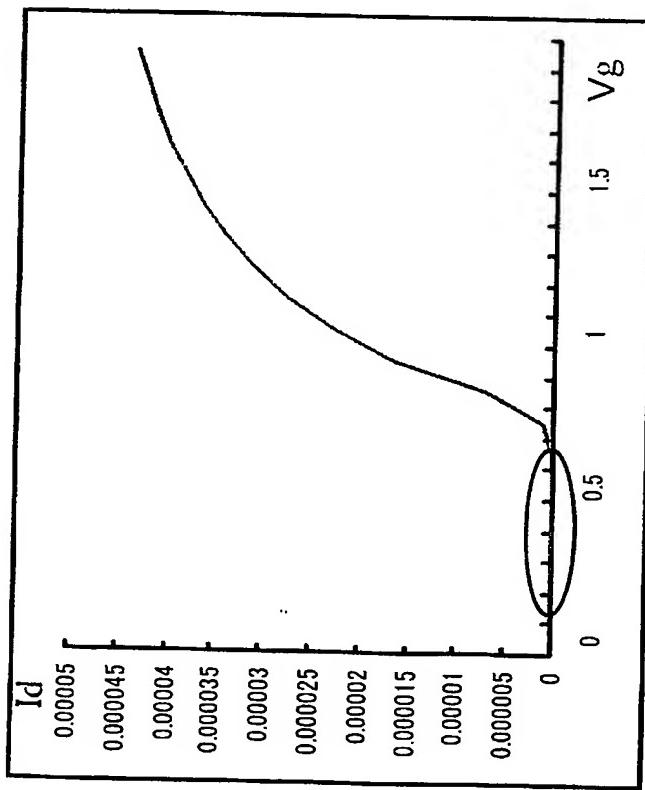
【図5】



【図6】

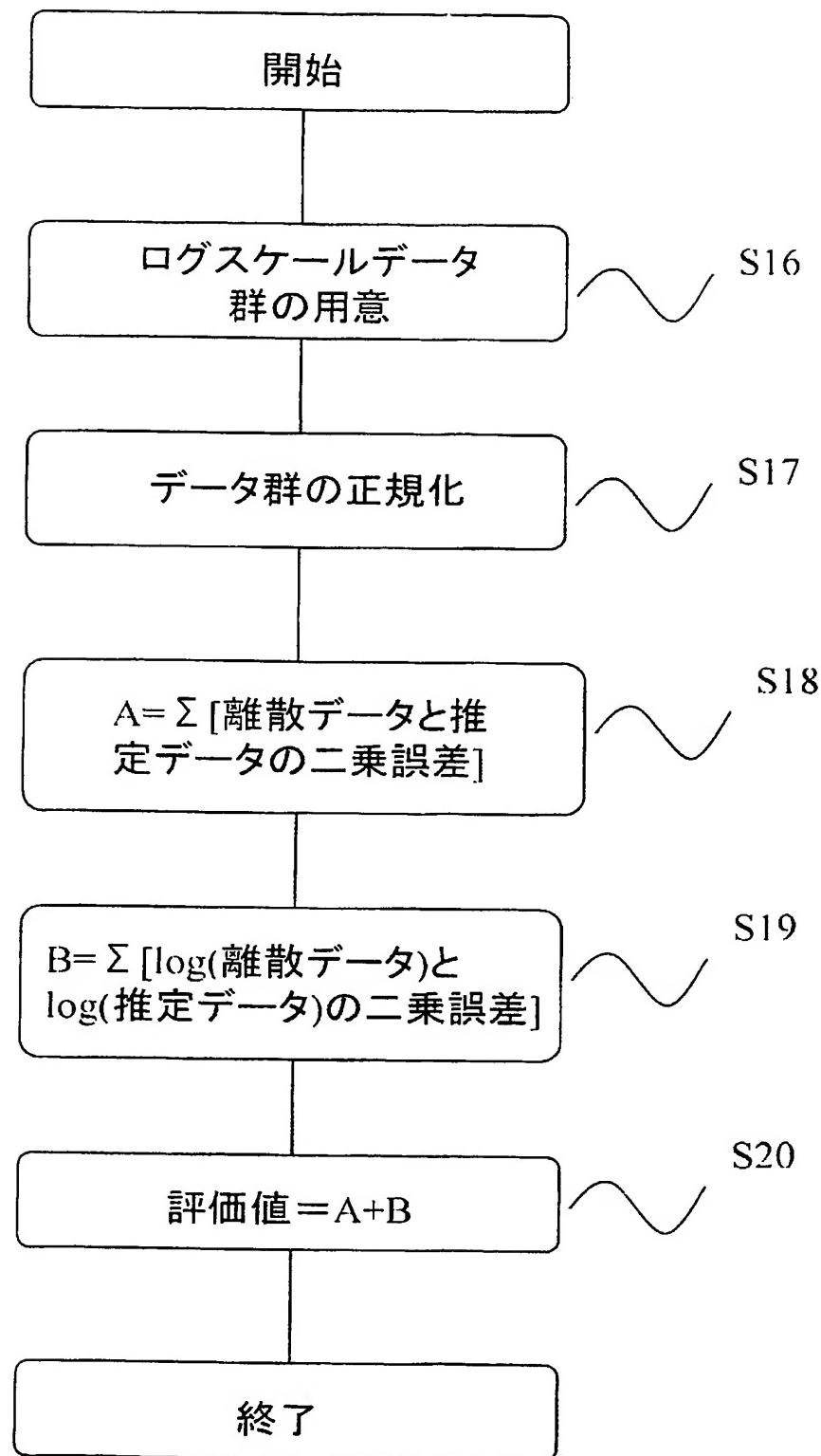


(b)

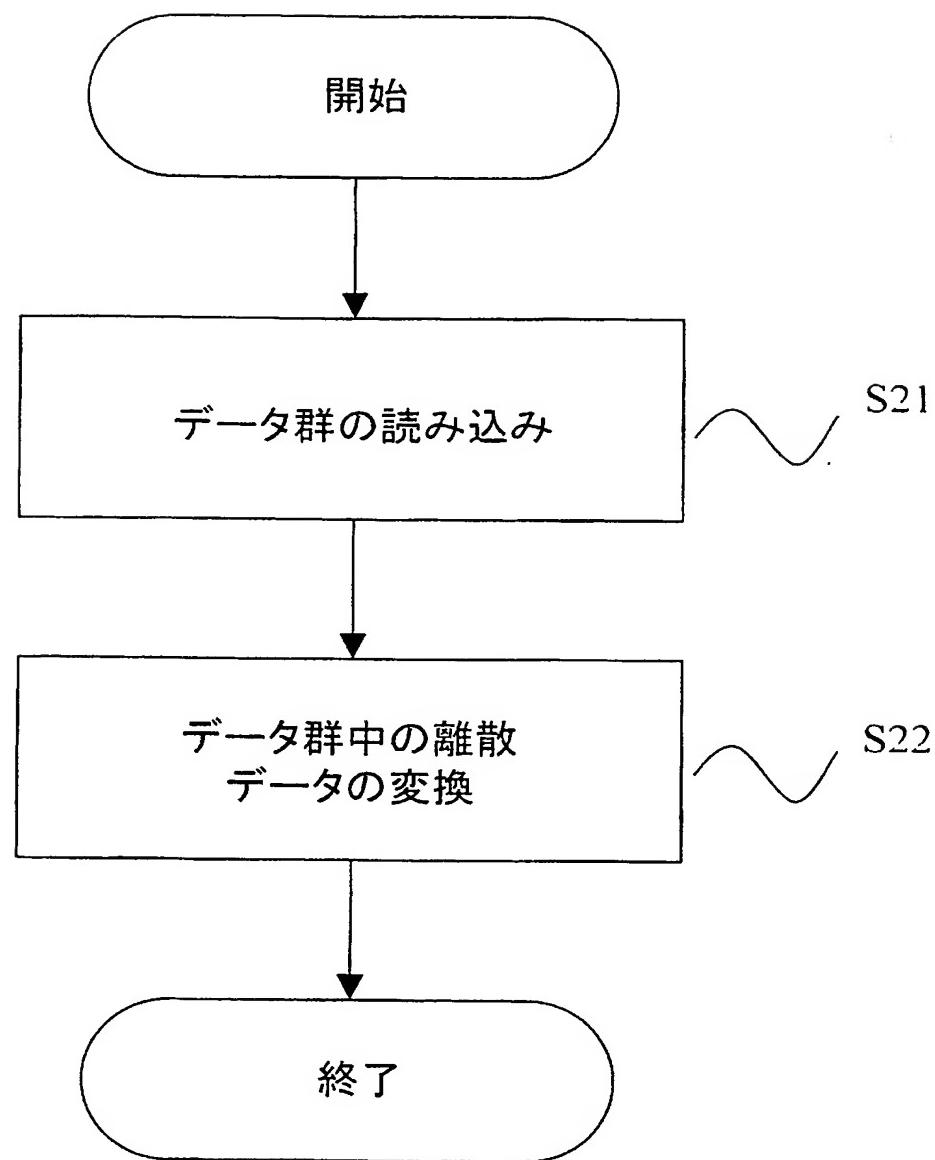


(a)

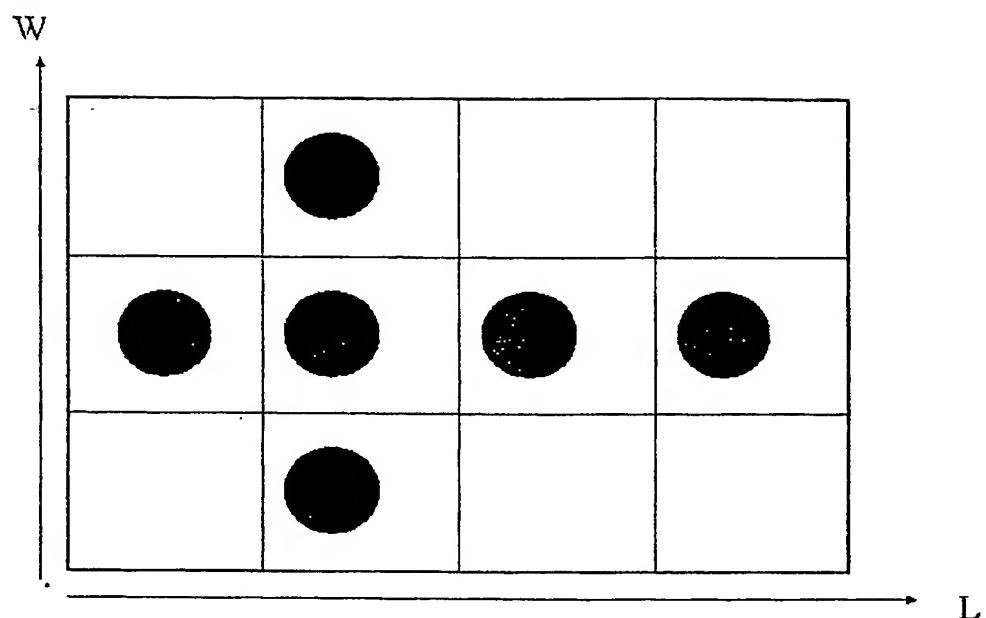
【図7】



【図8】



【図9】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】遺伝的アルゴリズムをトランジスタの物理モデルのパラメータ調整に適用して効率および精度のよいパラメータの調整を行うこと。

【解決手段】パラメータ調整装置は特殊な交叉処理によって新たなパラメータ遺伝子を生成する手段を備える。また、実数であるパラメータに適用するために正規化手段を備える。更に、トランジスタ（MOSFET）特有の特性に高精度で合致するようにパラメータの評価を行う評価手段を備える。このような構成によって、トランジスタの物理モデルのパラメータ調整に遺伝的アルゴリズムを適用することが可能となり、短時間で最適なパラメータ群を決定でき、このパラメータを使用して高精度の回路シミュレーションができる。

【選択図】図1

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2003-275037
受付番号	50301175155
書類名	特許願
担当官	第七担当上席
作成日	0096 平成15年 7月22日

<認定情報・付加情報>

【提出日】	平成15年 7月16日
-------	-------------

特願 2003-275037

出願人履歴情報

識別番号

[301080459]

1. 変更年月日

[変更理由]

住 所

氏 名

2001年12月17日

新規登録

東京都千代田区神田司町二丁目2番地12

株式会社進化システム総合研究所

2. 変更年月日

[変更理由]

住 所

氏 名

2004年 3月29日

住所変更

東京都港区浜松町二丁目1番13号

株式会社進化システム総合研究所

特願 2003-275037

出願人履歴情報

識別番号

[597114926]

1. 変更年月日

[変更理由]

住 所

氏 名

2002年 4月10日

住所変更

茨城県つくば市小野川16番地1

株式会社半導体先端テクノロジーズ

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.